# تأثیر چینه‌نگاری مکانیکی بر سبک ساختاری در بخش میانی کمربند چین‌خورده–رانده زاگرس

**مهدی نجفی [۱]، علی یساقی [۲*] و عباس بحرودی [۳]**

[۱] دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[۲] دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
[۳] استادیار، دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۰/۰۲/۱۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۲/۰۶

## چکیده

ویژگی‌های مکانیکی پوشش رسوبی به‌ویژه عملکرد جدایشی واحدهای سنگی شکل‌پذیر از عوامل اصلی کنترل‌کننده سبک دگریختی در کمربندهای چین‌خورده و رانده است. این مقاله با تفسیر خطوط لرزه‌ای بازتابی به همراه الگوسازی آنالوگ، به بررسی عملکرد این واحدهای شکل‌پذیر در بخش میانی کمربند زاگرس می‌پردازد. تفسیر برش‌های لرزه‌ای نشان می‌دهد که سازند گچساران به سن میوسن به عنوان یک افق شکل‌پذیر با ستبرای زیاد در میانه پوشش رسوبی حضور دارد و با عملکرد جدایشی خود موجب تغییر سبک ساختاری از سطح به ژرفا شده است، به‌گونه‌ای که هندسه چین‌های سطحی انطباقی با هندسه ساختارهای موجود در واحدهای پیش از میوسن ندارد. افزون بر این، یک افق جدایش مؤثر دیگر در قاعده پوشش رسوبی و بر روی پی‌سنگ واقع شده است که می‌تواند سری هرمز یا معادل‌های جانبی آن باشد. برای شبیه‌سازی آزمایشگاهی از عملکرد همزمان دو افق شکل‌پذیر جدایشی، مدل آنالوگی طراحی شد که در آن پوشش رسوبی شامل دو لایه شکل‌پذیر از جنس خمیر سیلیکون هرکدام به ستبرای ۱۵ درصد از کل ستون چینه‌نگاری، یکی در قاعده و دیگری در میانه پوشش رسوبی متشکل از ماسه خشک بود. نتایج به‌دست آمده از مدل، ساختارهای مشابهی را با بخش میانی کمربند چین‌خورده و رانده زاگرس نشان می‌دهد. در حالی که در ژرفا و در بین دو افق جدایشی، راندگی‌ها و چین‌های فرادیواره‌ای مرتبط با آنها در یک سامانه دوپلکسی ایجاد شده‌اند، در سطح و در بالای افق جدایش میانی، ناودیس‌های باز با طول موج بلند و تاقدیس‌های با طول موج کوتاه همراه با راندگی‌های بسیار کم‌شیب گسترش یافته‌اند. بنابراین آگاهی از رفتار جدایشی افق‌های شکل‌پذیر برای پی بردن به سبک ساختارهای زیرین آنها، به منظور اکتشافات هیدروکربوری در مخازن ژرف زاگرس، امری ضروری است.

**کلیدواژه‌ها:** افق جدایش، کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس، الگوسازی آنالوگ.

***نویسنده مسئول:** علی یساقی
E-mail: yassaghi@modares.ac.ir

## ۱- پیش‌گفتار

ویژگی‌های مکانیکی پوشش رسوبی یکی از عوامل اساسی کنترل‌کننده سبک دگریختی در کمربندهای چین‌خورده- رانده است (Davis & Engelder, 1985; Cotton & Koyi, 2000; Turrini et al., 2001; Spratt et al., 2004). سبک دگریختی پوشش رسوبی در کمربندهای چین‌خورده- رانده دارای افق‌های جدایش میانی در بالا و زیر این افق‌های جدایش متفاوت بوده و سبک چین‌خوردگی در سطح الزاماً ساختارهای ژرف را منعکس نمی‌کند (O' Brein, 1957; Spratt et al., 2004; Massoli & Koyi, 2006; Sherkati et al., 2006).

کمربند چین‌خورده–رانده زاگرس به دلیل ناهمسانی شدید رئولوژیکی پوشش رسوبی ناشی از حضور واحدهای سنگی نامقاوم با ستبرای قابل توجه یک نمونه ایده‌آل برای مطالعه اثر عملکرد افق‌های شکل‌پذیر جدایشی میانی در کمربندهای چین‌خورده- رانده است. پوشش رسوبی زاگرس دارای تغییرات قابل توجه در رخساره و ستبرای واحدهای سنگی است (Stocklin, 1974; Motiei, 1995; Alavi, 2004)، در نتیجه ویژگی‌های مکانیکی واحدهای سنگی هم به‌صورت قائم از ژرفا تا سطح و هم به‌صورت جانبی در طول کمربند زاگرس تغییر می‌کند (Bahroudi & Koyi, 2003; Sherkati & letouzey, 2004; Sepehr & Cosgrove, 2004). در چند سال اخیر پژوهشگران بسیاری به مطالعه چینه‌نگاری مکانیکی و عملکرد افق‌های شکل‌پذیر جدایشی میانی در کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس پرداخته‌اند و اهمیت این موضوع را تبیین کرده‌اند (O'Brien, 1957; Bahroudi & Koyi, 2003; Sherkati & letouzey, 2004; Mc Quarrie, 2004; Sherkati et al., 2006; Carruba et al., 2006).

از آنجایی که دست‌یابی به هندسه ساختارهای ژرف به منظور اکتشافات هیدروکربوری در بخش میانی کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس ضروری است و اختلاف در ویژگی‌های مکانیکی پوشش رسوبی عامل اصلی تغییرات سبک ساختاری از سطح به ژرفاست، انجام این مطالعه در ادامه مطالعات پیشین روی چگونگی عملکرد واحدهای مختلف سنگی با ویژگی‌های متفاوت مکانیکی به‌ویژه واحدهای سنگی با رفتار شکل‌پذیر می‌تواند سبب افزایش دانش ما در سازوکار و سبک چین‌خوردگی و گسلش در بخش‌هایی از کمربندهای چین‌خورده- رانده با عملکرد افق‌های جدایشی شکل‌پذیر میانی و قاعده‌ای شود.

در این مقاله برای بررسی عملکرد افق‌های جدایشی، برش‌های لرزه‌ای بازتابی ژرف در بخش‌هایی از کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس که افقی شکل‌پذیر ستبر در میانه و قاعده پوشش رسوبی حضور دارد استفاده شده‌اند. سپس به منظور راستی‌آزمایی ایده‌های به‌دست آمده مدل آنالوگ طراحی شده و نتایج مدل‌سازی آنالوگ با هندسه ساختاری چین‌های منطقه مطابقت داده شده و تأثیر عملکرد افق‌های جدایشی بر سبک چین‌خوردگی در بخش مرکزی کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس تحلیل شده است.

## ۲- جایگاه زمین‌ساختی

کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس بخش پیش‌بوم کوهزاد زاگرس است (Alavi, 2004). این کوهزاد در نتیجه برخورد قاره- قاره صفحات عربی و اوراسیا در میوسن پایانی (Berberian, 1995) روی لبه شمال خاوری صفحه عربی ایجاد شده (شکل ۱- الف) و در یک فرایند دگریختی فشاری از پهنه برخوردی سنندج- سیرجان به سوی جنوب باختری در حال تکوین بوده است. چنین برخورد قاره- قاره‌ای نه تنها با گسترش و تکامل کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس همراه بوده، بلکه موجب دگریختی در پی‌سنگ متبلور پرکامبرین با فعالیت دوباره گسل‌های پی‌سنگی به همراه پوشش رسوبی شده و بنابراین تلفیقی از دگریختی نازک‌پوسته

و ستبرپوسته در کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس را به وجود آورده است (Hessami et al., 2001; Bahroudi & Talbot, 2003; Yassaghi, 2006).

کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس، بر پایه سبک ساختاری و تاریخ رسوبی به چند پهنه تقسیم شده است (شکل ۱). زاگرس به پهنه‌هـای ساختاری با راستای NW SE - موازی حاشیه قاره تقسیم می‌شود که توسط گسل‌های وارون اصلی از هم جدا شده‌اند. گسل‌های راندگی اصلی، راندگی زاگرس بلند و گسل سورمه موجب تقسیم زاگرس شده‌اند. افزون بر این کمربند زاگرس به‌صورت عرضی نیز از شمال باختر به سوی جنوب خاور به سه زیر پهنه لرستان، فروبار دزفول و فارس تقسیم می‌شود. این پهنه‌ها به وسیله گسل‌های عرضی- برشی چون بالارود و کازرون از یکدیگر جدا می‌شوند (Berberian, 1995; Sepehr & Cosgrove, 2004). به دلیل تفاوت در عوامل کنترل کننده دگریختی مانند عملکرد گسل‌های پی‌سنگی و رئولوژی پوشش رسوبی، هرکدام از این پهنه‌ها ساختارهای ویژه خود را در خلال کوتاه شدگی زاگرس ایجاد کرده‌اند.

## ۳- چینه‌نگاری مکانیکی

لبه شمال‌خاوری ورق عربی از زمان کامبرین تا برخورد نهایی در میوسن هم در جایگاه کافتی و هم به عنوان حاشیه غیر فعال در معرض رسوب‌گذاری پیوسته قرار داشته است، به‌گونه‌ای که موجب نهشته شدن یک توالی رسوبی با ستبرای بیش از ۱۰ کیلومتر شده است. این پوشش رسوبی دارای تغییرات قابل توجه در رخساره و ستبرای واحدهای سنگی است (Stocklin, 1974; Motiei, 1995; Alavi, 2004)، در نتیجه رئولوژی پوشش رسوبی زاگرس به‌صورت جانبی و از ژرفا تا سطح توالی در همه جا یکسان نیست و ویژگی‌های مکانیکی واحدهای سنگی هم به‌صورت قائم از ژرفا تا سطح و هم به‌صورت جانبی در طول کمربند زاگرس تغییر می‌کند (Bahroudi & Koyi, 2003; Sherkati & letouzey, 2004; Sepehr et al., 2006). چند افق شکل‌پذیر جدایشی در ستون چینه‌نگاری بیشتر مناطق زاگرس معرفی شده است (شکل ۱- ب)، مهم‌ترین آنها در قاعده پوشش رسوبی و افق‌های دیگر در بخش‌های میانی پوشش رسوبی قرار دارند (Sherkati et al., 2006) (شکل ۲). سازند نمک هرمز به سن کامبرین با ستبرای بیش از یک کیلومتر به عنوان افق جدایش قاعده‌ای، پوشاننده پی‌سنگ است (Stocklin, 1974; Bahroudi & Koyi, 2003). اگر چه در برخی مناطق ممکن است شیل‌های پالئوزوییک با ستبرای زیاد جانشین نمک هرمز باشد، ولی به هرحال حضور یک افق شکل‌پذیر قاعده‌ای با ستبرای زیاد و مقاومت کم تقریباً در همه جای زاگرس قطعی است (Carruba et al., 2006). تبخیری‌های تریاس (سازند دشتک) و تبخیری‌های میوسن (سازند گچساران) در مناطق مختلف کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس نقش افق‌های جدایش میانی اصلی را بر عهده دارند (شکل ۱- ب) (Sherkati & Letouzey, 2004; Sherkati et al., 2006). گفتنی است که این دو سازند در بخش‌های دیگری از کمربند زاگرس نیز حضور دارند ولی تغییرات جانبی در رخساره و ستبرای این سازندها موجب شده است تا نقش خود را به عنوان افق جدایش میانی اصلی از دست بدهند (Bahroudi & Koyi, 2004). همچنین تعدادی افق جدایش فرعی در میانه پوشش رسوبی برخی مناطق زاگرس حضور دارند (Sherkati et al., 2006) که در این مطالعه از آنها صرف‌نظر شده است.

## ۴- هندسه ساختاری

در بخش‌هایی از کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس که افقی شکل‌پذیر با ستبرای زیاد در میانه پوشش رسوبی حضور دارد، عملکرد افق‌های شکل‌پذیر جدایشی میانی موجب تغییر سبک چین‌خوردگی از سطح تا ژرفا شده است. در نتیجه هندسه چین‌های سطحی انطباقی با هندسه ساختارهای ژرفی ندارد. برای نمونه ناودیس‌های چند کیلومتری پیرسرتا و کوه‌بوزان که واحدهای جوان‌تر از گچساران را در بر می‌گیرند روی سازند گچساران جدایش یافته‌اند و لولای آنها دقیقاً در بالای لولای تاقدیس‌های زیرین قرار دارد (Carruba et al., 2006) (شکل ۳). همچنین در تاقدیس‌های پارسی، پرنج و کرنج واقع در فروبار دزفول افق شکل‌پذیر میانی موجب تمایز سبک ساختاری دو بخش چین‌خورده بالایی و زیرین افق جدایشی گشته است. در سطح ناودیس‌های باز و در سنگ‌های کربناتی مقاوم مزوزوییک واقع در زیر سازند شکل‌پذیر گچساران تاقدیس‌ها و راندگی‌های پیش‌یالی توسعه دارند (Sherkati et al., 2006) (شکل ۴).

## ۵- مدل‌سازی آنالوگ

بر پایه هندسه ساختاری چین‌ها و چینه‌نگاری مکانیکی کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس و به منظور بررسی تأثیر افق‌های جدایشی شکل‌پذیر بر سبک دگریختی این کمربند، مدلی آنالوگ طراحی شد. در مدل پوشش رسوبی شامل دو لایه شکل‌پذیر از جنس خمیر سیلیکون هرکدام به ستبرای ۱۵ درصد از کل ستون چینه‌نگاری، یکی در قاعده و دیگری در میانه پوشش رسوبی متشکل از ماسه خشک قرار داده شدند (شکل ۵). ستبرای کل پوشش رسوبی در بخش‌های مختلف کمربند زاگرس بین ۸ تا ۱۲ کیلومتر متغیر است (James & Wynd, 1965; Koop & Stoneley, 1982; Ghavidel-Syooki, 1996). همچنین ستبرای سری نمکی هرمز متغیر و بین ۱ تا ۲ کیلومتر در بخش‌های مختلف کمربند زاگرس گزارش شده است (Stöcklin, 1974; Talbot & Alavi, 1996; Bahroudi & Koyi, 2003). میانگین ۱۰ کیلومتر برای ستبرای پوشش رسوبی و میانگین ۱/۵ کیلومتر برای سری هرمز نسبت ۱۵ درصد را نتیجه می‌دهد که در مدل منظور شد. مطالعات الگوسازی پیشین از کمربند زاگرس نیز درصد مشابهی را برای افق جدایش قاعده‌ای (هرمز) منظور کرده‌اند (Bahroudi & Koyi, 2003; Sherkati et al., 2006; Emami, 2008).

خمیر سیلیکون رفتار شکل‌پذیر نیوتونی دارد که این ویژگی باعث می‌شود سیلیکون برای مدل کردن رفتار شکل‌پذیر تبخیری‌ها (نمک و ژیپس)، شیل‌ها و رس‌ها در پوسته بالایی مناسب باشد و ماسه برای مدل کردن رفتار شکنای سنگ‌های پوسته بالایی مناسب است چرا که ماسه ماده‌ای است که رفتاری شبیه به رفتار مور- کلمب دارد و دگریختی آن مستقل از زمان است. زاویه اصطکاک داخلی ماسه حدود ۳۰ درجه است، یعنی نزدیک به زاویه اصطکاک داخلی سنگ‌ها در فشار و دمای بخش‌های بالایی پوسته است (Richard et al., 1989).

در مقیاس قائم مدل هر ۱ کیلومتر برابر ۷ میلی‌متر در نظر گرفته شده و لایه‌هایی از ماسه رنگ شده به عنوان نشانگرهای دگریختی در ستون رسوبی قرار داده شدند. کوتاه‌شدگی عمود بر مدل با نرخ ۱۰ میلی‌متر در ساعت و تا دست‌یابی به ۲۵ درصد کوتاه‌شدگی، که کوتاه‌شدگی متداول چیره در کمربندهای چین‌خورده- رانده است، ادامه یافت. در این الگوسازی پی‌سنگ در دگریختی شرکت نداشته و تنها پوشش رسوبی تحت کوتاه شدگی قرار گرفت (شکل ۵).

با توجه به همگرایی مورب میان صفحات عربی و اوراسیا (Mc Clay et al., 2004; Hessami et al., 2001)، بخش‌بندی کرنش (strain partitioning) در زاگرس رخ داده است. بخش‌بندی کرنش باعث شده است که دگرشکلی به دو مؤلفه کوتاه‌شدگی (در نتیجه تنش‌های فشارشی) و مؤلفه دگرشکلی امتدادلغز (در نتیجه مؤلفه برشی تنش) تفکیک شود. با توجه به مسئله این پژوهش که بررسی تأثیر افق‌های جدایشی در سبک چین‌خوردگی و گسلش راندگی است، مؤلفه کوتاه‌شدگی دگرشکلی به عنوان مؤثرترین مؤلفه بر اثر افق‌های جدایشی در سبک چین‌خوردگی الگوسازی شده است. مطالعات مشابهی که به بررسی تأثیر افق‌های جدایشی در زاگرس پرداخته‌اند نیز همگی مؤلفه کوتاه‌شدگی را عمود بر مدل در نظر گرفته‌اند (Sherkati, 2006; Jahani, 2008; Emami, 2008).

در الگوسازی‌های آنالوگ پیشین با دو افق جدایش از دیگر بخش‌های زاگرس چین‌خورده- رانده، تأثیر ژرفای افق جدایش میانی بر سبک چین‌خوردگی بررسی شده است. نتایج این بررسی نشان داد که ژرفای افق جدایش میانی یک عامل مهم در تعیین هندسه و طول موج چین‌هاست و به‌طور عمومی افق‌های جدایش به ترتیب از افق‌های ژرف‌تر به افق‌های کم‌ژرفاتر شروع به فعالیت می‌کنند (Sherkati et al., 2006). الگوسازی‌های مشابه در دیگر کمربندهای چین‌خورده- رانده نیز نتایج مشابهی نشان داد. برای نمونه Massoli & Koyi (2006) نیز افق جدایش میانی و قاعده‌ای نیمه‌شکل‌پذیر را با ماده نیمه‌شکل‌پذیر دانه‌های شیشه‌ای شبیه‌سازی کردند و نتیجه گرفتند در طول دگریختی مدل‌ها، این دو افق جدایش دو دسته ساختار با هندسه متفاوت ایجاد می‌کنند که ساختارهای ژرف که با افق جدایش قاعده‌ای ایجاد شده‌اند از ساختارهای کم‌ژرفا بزرگ‌تر و مهم‌تر هستند.

## ۶- نتایج مدل و مقایسه آنها با مثال‌های طبیعی از کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس

پس از پایان آزمایش و انجام مراحل ثابت‌سازی مدل، برش‌هایی عمود بر روند ساختارها از مدل‌ها تهیه و عکسبرداری شد (شکل ۶). بررسی نتایج به‌دست‌آمده از مدل (شکل ۶) و مقایسه با بخشی از ساختارهای کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس در فروبار دزفول (شکل‌های ۳ و ۴) نشان می‌دهد که در خلال گسترش چین‌ها افق جدایش میانی با مهاجرت جانبی از تاقدیس‌ها به ناودیس‌ها دچار تغییر ستبرای قابل‌توجهی می‌شود (شکل ۶). در بالای افق جدایش میانی، ناودیس‌های باز با طول موج بلند و تاقدیس‌های با طول موج کوتاه همراه با راندگی‌های بسیار کم‌شیب تشکیل شده‌اند. همه این ساختارها به‌طور کامل در بالای افق جدایش میانی نسبت به ساختارهای توسعه یافته در زیر این افق، جدایش یافته‌اند (شکل ۶). همانند چنین هندسه ساختاری را می‌توان از بررسی پروفیل‌های لرزه‌ای به‌دست آمده در دیگر بخش‌های زاگرس چین‌خورده از جمله فروبار دزفول دید (شکل‌های ۳ و ۴). هندسه چین‌خوردگی در واحدهای مقاوم بین دو افق جدایشی، مشابه سبک چین‌های انتشار گسلی هستند (شکل ۶). به نظر می‌رسد که این چین‌ها با توجه به هندسه آنها در برش‌های متفاوت ابتدا به‌صورت جدایشی شکل گرفته‌اند و سپس به‌صورت تأخیری توسط راندگی‌ها بریده شده‌اند (شکل ۶). گسل‌های راندگی هندسه‌ای همانند هندسه سامانه گسل‌های راندگی دوپلکسی دارند، به‌گونه‌ای که گسل‌های این سامانه از افق جدایش قاعده‌ای منشأ می‌گیرند در افق جدایش میانی مستهلک شده و هندسه فلت- رمپ-فلت به خود می‌گیرند (شکل ۶- ج). همانند چنین سامانه گسل‌های راندگی و چین‌های همراه در پروفیل‌های لرزه‌ای به‌دست آمده در فروبار دزفول (شکل ۴) نیز دیده شده است.

در واقع واحدهایی که در ترازهای ساختاری مختلف قرار دارند، میزان کوتاه‌شدگی یکسانی را تحمل می‌کنند، ولی به سبک‌های متفاوتی به این کوتاه‌شدگی پاسخ می‌دهند. واحدهای نزدیک به سطح مدل کوتاه‌شدگی اعمالی را با چین‌خوردگی بیشتر و واحدهای بین دو سطح جدایش، این کوتاه‌شدگی را با گسترش گسل‌های راندگی بیشتر پاسخ می‌دهند. برش‌های لرزه‌ای ارائه شده در شکل‌های ۳ و ۴ چنین تغییر سبکی از دگریختی را نشان می‌دهند. در این برش‌ها نیز گسلش راندگی بیشتر در واحدهای مقاوم مزوزوییک و پالئوزوییک بالایی که بین دو افق جدایشی سازند گچساران و سری هرمز واقع هستند گسترش یافته است در حالی که پوشش رسوبی جوان‌تر از گچساران بیشتر دچار چین‌خوردگی شده‌اند. گاهی عملکرد افق شکل‌پذیر قاعده‌ای با ستبرای زیاد، بیشتر موجب میل به سوی پس‌بوم ساختارها در واحدهای بین دو افق جدایشی و ایجاد هندسه بالا جسته می‌شود (شکل‌های ۳ و ۷).

چهار نوع رابطه زمانی بین چین‌ها و گسل‌ها در واحدهای بین دو افق جدایش دیده می‌شود (شکل ۶)؛ چین‌های انتشار گسلی که در فرادیواره راندگی‌ها ایجاد شده‌اند (شکل ۶- ج)؛ گسل‌های مرتبط با چین که در اثر کمبود فضا در پهلوی چین‌های جدایشی تشکیل شده‌اند (شکل ۶- ب)، چین‌هایی که به‌صورت تأخیری با راندگی‌ها بریده شده‌اند (شکل ۶- الف) و سطوح راندگی که در جریان دگریختی پیشرونده خمیده شده و چین خورده‌اند (شکل ۶- ب).

در همه برش‌های شکل ۶ پیشانی دگریختی در واحدهای سطحی پیشرفت بیشتری را به سوی پیش‌بوم نسبت به واحدهای مشابه در ژرفا دارد. واحدهای رسوبی پوشاننده افق‌های جدایش گر چه دارای رئولوژی و ستبرای یکسانی در ابتدای آزمایش هستند و در خلال آزمایش نیز دچار کوتاه‌شدگی یکسانی شده‌اند، ولی پس از دگریختی، سبک ساختاری کاملاً متفاوتی را نشان می‌دهند (شکل ۶). به نظر می‌رسد که ژرفای این واحدها، فاصله آنها از پی‌سنگ و مهم‌تر از همه قرارگیری آنها رو یا میان افق‌های شکل‌پذیر جدایشی تعیین کننده این تفاوت در سبک ساختاری است.

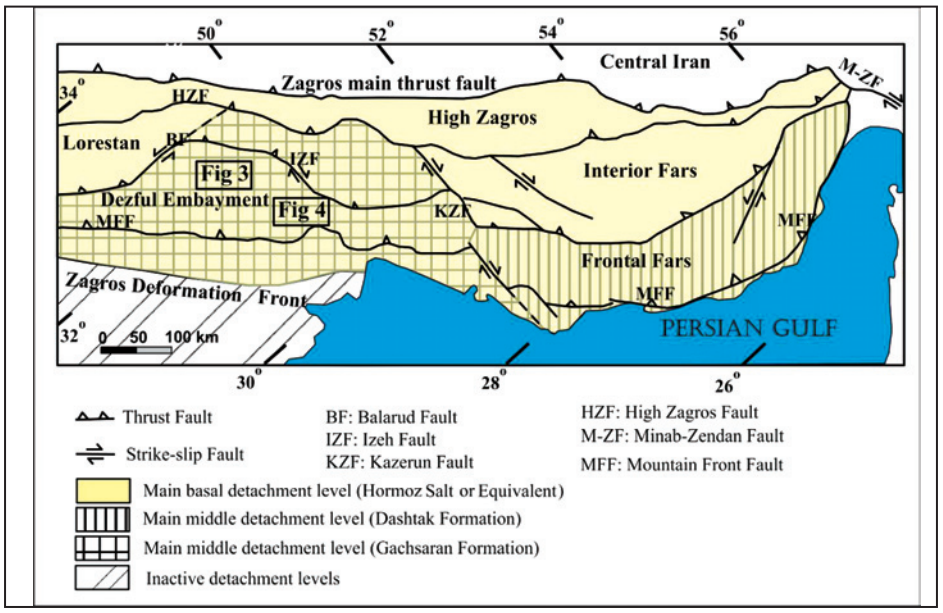
## ۷- نتیجه‌گیری

نتایج حاصل از تفسیر خطوط لرزه‌ای بازتابی از بخش مرکزی کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس و الگوسازی آنالوگ با حضور دو افق شکل‌پذیر جدایشی نشان می‌دهد که عملکرد افق شکل‌پذیر میانی با ستبرای زیاد و مقاومت کم موجب جدایش کامل سبک و هندسه ساختارها در سطح نسبت به ژرفا می‌شود. در ژرفا و در زیر افق جدایش میانی، راندگی‌ها و چین‌های فرادیواره‌ای مرتبط با آنها گاهی در یک سامانه دوپلکسی ایجاد می‌شوند و گاهی عملکرد افق شکل‌پذیر قاعده‌ای با ستبرای زیاد موجب میل به سوی پس‌بوم ساختارها و ایجاد هندسه بالاجسته می‌شود. اما در سطح و در بالای افق جدایش میانی، ناودیس‌های باز با طول موج بلند و تاقدیس‌های با طول موج کوتاه همراه با راندگی‌های بسیار کم‌شیب تشکیل می‌شوند.

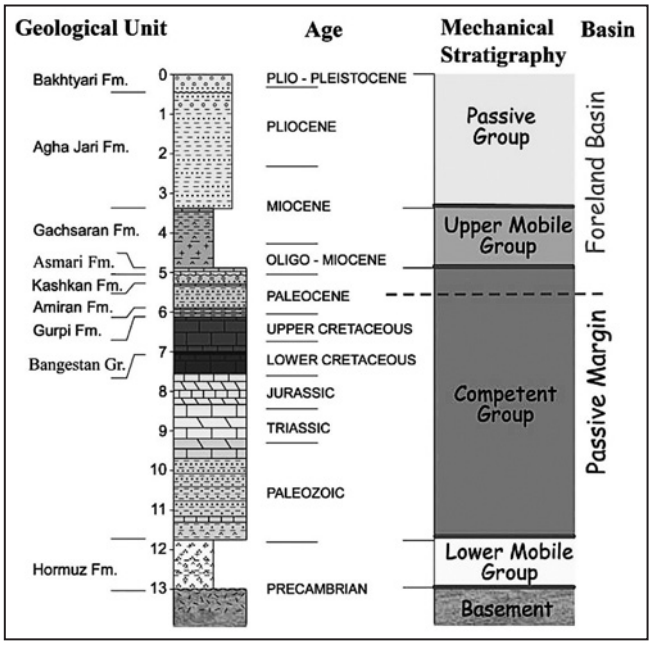
برخی از حفاری‌های اکتشافی ناموفق در کمربندهای چین‌خورده- رانده به دلیل نادیده گرفتن عملکرد افق جدایش میانی و تعمیم دادن ساختارهای سطح به ژرفا بوده است که موجب حفاری‌های بیرون از ساختار شده است. در این موارد بخش ستیغ تاقدیس در سطح به عنوان محل حفاری انتخاب می‌شده است؛ در حالی که عملکرد افق شکل‌پذیر جدایشی در میانه پوشش رسوبی موجب تمایز سبک چین‌خوردگی از سطح تا ژرفا بوده و در نتیجه راهی به ستیغ چین‌های ژرف دارای مخازن هیدروکربوری نمی‌یافته است. بنابراین پیش‌بینی رفتار افق‌های شکل‌پذیر برای پی بردن به سبک ساختارهای ژرف در کمربندهای چین‌خورده- رانده که پوشش رسوبی آنها ناهمسانی رئولوژیکی شدیدی دارد، امری ضروری است.

## سپاسگزاری

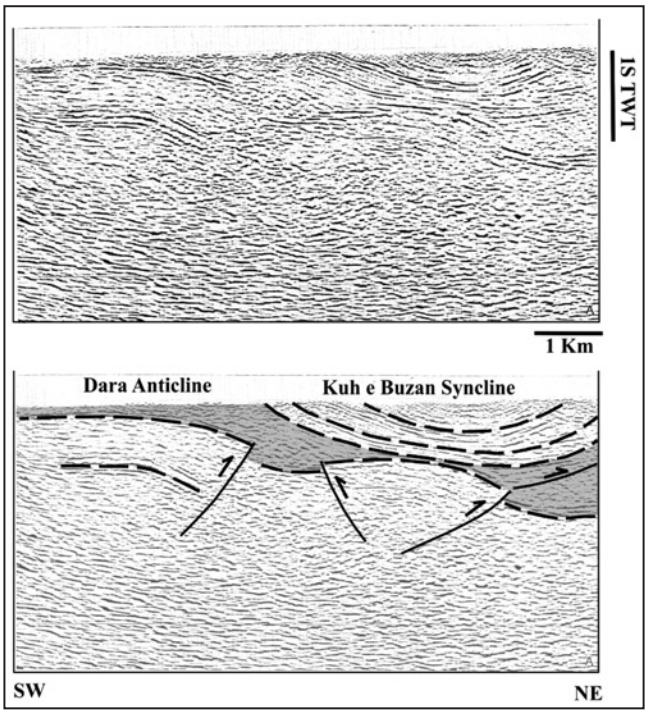
از مسئولان پژوهشکده علوم زمین سازمان زمین‌شناسی کشور برای ارائه امکانات آزمایشگاهی سپاسگزاری می‌شود.



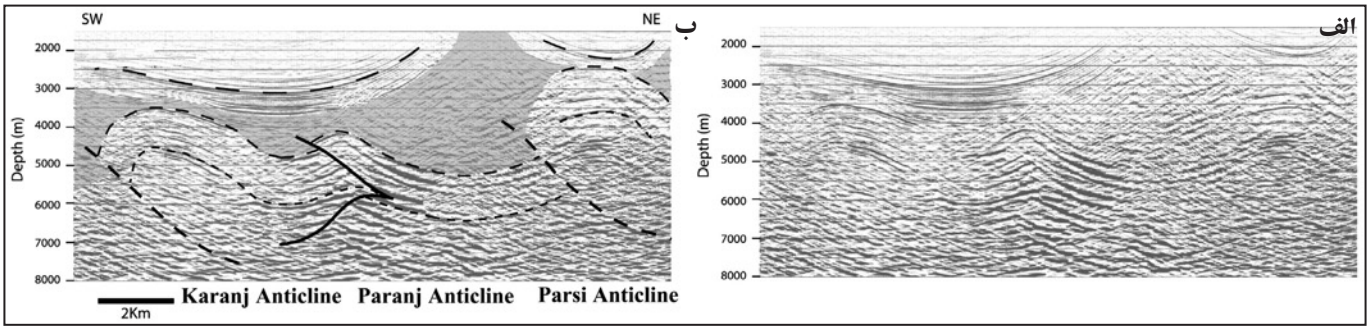

شکل ۱- زیر پهنه‌های ساختاری در مرکز و جنوب‌خاور کمربند چین‌خورده- رانده زاگرس (برگرفته از Sepehr & Cosgrove, 2004). همچنین پراکندگی افق‌های جدایشی اصلی در کمربند زاگرس نشان داده شده است (Sherkati & Letouzey, 2004; Sherkati et al., 2006). حضور یک افق شکل‌پذیر قاعده‌ای اصلی (سری تبخیری هرمز یا شیل‌های پالئوزوییک) تقریباً در همه جای زاگرس قطعی است. سازند دشتک در زیرپهنه فارس ساحلی و سازند گچساران در زیر پهنه فروبار دزفول به عنوان افق جدایش میانی اصلی رفتار کرده‌اند. گفتنی است که این دو سازند در بخش‌های دیگری از کمربند زاگرس نیز حضور دارند ولی تغییرات جانبی در رخساره و ستبرای این سازندها موجب شده است تا نقش خود را به عنوان افق جدایش میانی اصلی از دست بدهند که در این مناطق روی شکل نشان داده نشده‌اند. موقعیت ساختارهای نشان داده شده در شکل‌های ۳ و ۴ با مستطیل مشخص شده است.



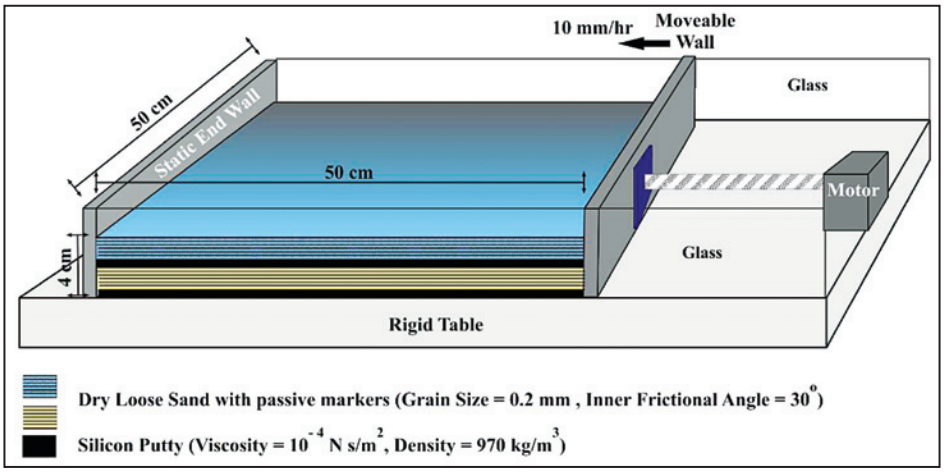

شکل ۲- موقعیت افق‌های شکل‌پذیر جدایشی شامل سری هرمز به‌عنوان افق جدایش قاعده‌ای و سازند گچساران به‌عنوان افق‌های جدایش میانی روی ستون چینه‌نگاری کمربند زاگرس در فروبار دزفول (برگرفته از Emami, 2008).



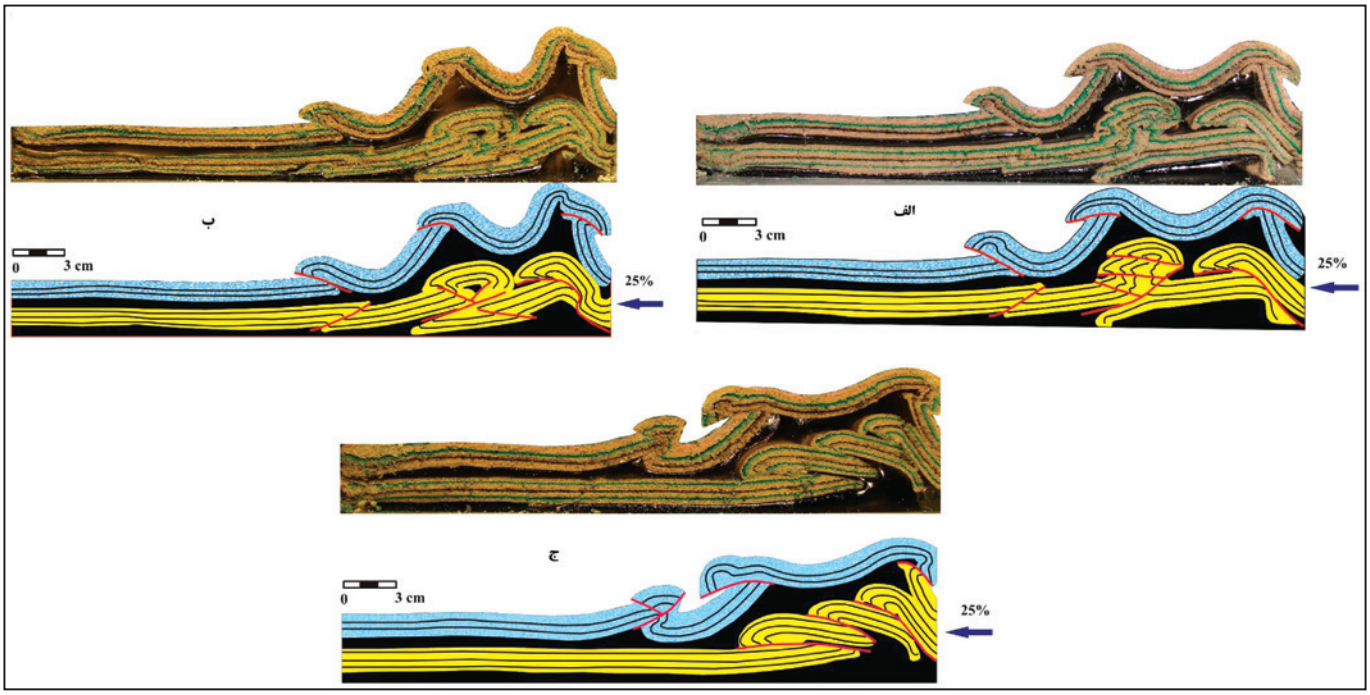

شکل ۳- برش لرزه‌ای بازتابی عمود بر تاقدیس دارا و ناودیس کوه‌بزان. ناودیس کوه‌بزان به‌طور کامل روی تبخیری‌های سازند گچساران جدایش یافته و لولای آن دقیقاً روی لولای تاقدیس دارا که در واحدهای کربناتی مقاوم مزوزوییک تشکیل شده‌است قرار دارد. یک پس‌راندگی مهم در پهلوی شمال‌خاوری تاقدیس دارا دیده می‌شود. این تاقدیس یک هندسه بالاجسته دارد و به سوی پس‌بوم (شمال خاور) میل دارد (برگرفته از Carruba et al., 2006).




شکل ۴- برش لرزه‌ای بازتابی عمود بر تاقدیس‌های پارسی، پرنج و کرنج واقع در فروبار دزفول. در این بخش سازند گچساران (بخش خاکستری رنگ در شکل ب) افق شکل‌پذیر میانی اصلی است که موجب تمایز سبک ساختاری دو بخش چین‌خورده بالایی و زیرین افق جدایشی گشته است. به توسعه ناودیس‌های باز در سطح و تاقدیس‌ها و راندگی‌های پیش‌یالی در سنگ‌های کربناتی مقاوم مزوزوییک واقع در زیر سازند شکل‌پذیر گچساران توجه شود ( برگرفته از Sherkati et al., 2006).




شکل ۵- شمایی از وضعیت اولیه مدل آنالوگ.




شکل ۶- برش‌هایی از وضعیت نهایی مدل نازک‌پوسته پس از اعمال ۲۵ درصد کوتاه‌شدگی؛ عملکرد افق شکل‌پذیر جدایشی در میانه پوشش رسوبی موجب جدایش کامل سبک دگریختی در واحدهای زیر و روی خود شده‌است؛ برای توضیحات بیشتر به متن مراجعه شود.

## References


Alavi, M., 2004- Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. American Journal of Science, vol. 304, p. 1-20.

Bahroudi, A. & Koyi, A., 2003- Effect of spatial distribution of Hormuz salt on deformation style in the Zagros fold and thrust belt: An analogue modelling approach. Journal of geological society.

Bahroudi, A. & Koyi, A., 2004- Tectono-sedimentary framework of the Gachsaran Formation in the Zagros foreland basin. Marine and Petroleum Geology.

Bahroudi, A. & Talbot, C. J., 2003- The configuration of the basement beneath the Zagros basin. Journal of Petroleum Geology, 26 (3), 257-282.

Berberian, M., 1995- Master-Blind-Thrust Faults Hidden under the Zagros Folds: Active Basement Tectonics and Surface Morphotectonics. Tectonophysics, 241, 193-224.

Carruba, S., Perotti, C., Buonaguro, R., Calabrò, R., Carpi, R. & Naini, M., 2006- Structural pattern of the Zagros fold-and-thrust belt in the Dezful Embayment (SW Iran) Special Paper 414: Styles of Continental Contraction, Article: pp. 11–32.

Cotton, J. T. & Koyi, H. A., 2000- Modeling of thrust front above ductile and frictional detachments; application to structures in the Salt Range and Portwar Plateau, Pakistan. Geological Society of America Bulletin, 112, 351-363.

Davis, D. M. & Engelder, T., 1985- The role of salt in fold and thrust belts. Tectonophysics 119, 67-88.

Emami, H., 2008- Freland propagation folding and structure of the mountain front flexture in the Pusht-E Kuh arc (NW Zagros, Iran. Phd Thesis, Barcelona University.

Ghavidel-Syooki, M., 1996- Acritarch Biostratigraphy of the Paleozoic Rock Units in the Zagros Basin, Southern Iran. Acta Universitatis Carolinae, Geologica, 40, 385-411.

Hessami, K., Koyi, H. A., Talbot, C. J., Tabasi, H. & Shabanian, E., 2001- Progressive unconformities within an evolving foreland fold-thrust belt, Zagros Mountains. Journal of the Geological Society, London, 158, 969 – 981.

James, G. A. & Wynd, J. G., 1965- Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area. AAPG Bulletin, 49, 2182–2245, doi:10.1306/A663388A-16C0-11d7-8645000102C1865d.

Jahani, S., 2008- Salt tectonics, folding and faulting in the Eastern Fars and southern offshore provinces (Iran). PhD Thesis. Université de Cergy – Pontoise. 207 pages.

Koop, W. J. & Stoneley, R., 1982- Subsidence history of the Middle East Zagros Basin, Permian to Recent. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, 305, 149–168, doi:10.1098/rsta.1982.0031, doi:10.1098/rsta.1982.0031.

Massoli, D. & Koyi, H., 2006- Structural evolution of a fold and thrust belt generated by multiple decollements: analogue models and natural examples from the Northern Appennines (Italy) Journal of structural geology 28(2006)185-199.

Mc Clay, K. R., Whitehouse, P. S., Dooley, T. & Richards, M., 2004- 3D evolution of fold and thrust belts formed by oblique convergence. Vol. 21, Issue 7, P 857–877. doi:10.1016/j.marpetgeo.2004.03.009.

McQuarrie, N., 2004- Crustal scale geometry of the Zagros fold-thrust belt, Iran. Journal of Structural Geology.

Motiei, H., 1995- Petroleum geology of Zagros. In: A. Hushmandzadeh, Editor, Treatise on the Geology of Iran, Geological Survey of Iran.

O'Brien, C. A. E., 1957- Salt diapirism in south Persia. Geol. Mijnbouw, 19, 357-376.

Richard, P., Ballard, J. F., Colletta, B. & Cobbold, P., 1989- "Naissance et evolution de failles au dessus d'un décrochement de socle: Modélisation analogique et tomographie." Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris, Série IIa 309: 2 111-2 118.

Sepehr, M. & Cosgrove, J. W., 2004- Structural Framework of the Zagros Fold– Thrust Belt, Iran. Marine and Petroleum Geology. 21, P. 829-834.

Sepehr, M., Cosgrove, J. & Moieni, M., 2006- The impact of cover rock rheology on the style of folding in the Zagros fold-thrust belt. Tectonophysics, vol. 427, p. 265-281.

Sherkati, S. & Letouzey, J., 2004- Variation of structural style and basin evolution in the central Zagros (Izeh zone and Dezful Embayment), Iran. Marine and Petroleum Geology. Vol. 21, No. 5, P. 535-554.

Sherkati, S., Letouzey, J. & Frizon de Lamotte, D., 2006- The Central Zagros fold-thrust belt (Iran): New insights from seismic data, field observation and sandbox modeling. Tectonics. Vol. 25.

Spratt, D. A., Dixon, J. M. & Beattie, E. T., 2004- Changes in structural style controlled by lithofacies contrast across transverse carbonate bank margins- Canadian Rocky Mountains and scaled physical models. In: K.R. McClay, Editor, Thrust tectonic and hydrocarbon systems: AAPG Memoir vol. 82, pp. 259–275.

Stocklin, J., 1974- Possible Ancient Continental Margins in Iran. In Burk, C.A., Drake, C.L., (Eds), Geology of the Continental Margins. Springer. New York, P. 873-887.

Talbot, C. J. & Alavi, M., 1996- The past of a future syntaxis across the Zagros. In: Alsop, G.I., Blundell, D.J. & Davison, I. (eds) Salt tectonics: Geological Society, London, Special Publications, 100, 89–109, doi:10.1144/GSL.SP.1996.100.01.08.

Turrini, C., Ravaglia, A. & Perotti, C. R., 2001- Compressional structures in a multi-layered mechanical stratigraphy: insights from sandbox modeling with three dimensional variation in basal geometry and friction. In: H.A. Koyi and N.S. Mancktelow, Editors, Tectonic Modeling: a Volume in Honour of Hans Ramberg, Geological Society of America Memoir 193, pp. 153–178.

Yassaghi, A., 2006- Integration of Landsat imagery interpretation and geomagnetic data on verification of deep-seated transverse fault lineaments in SE Zagros, international journal of remote sensing, 2006, pp.1-16.

# Influence of Mechanical Stratigraphy on Structural Style in the Central Zagros Fold-Thrust Belt

**M. Najafi [1], A. Yassaghi [2*], A. Bahroudi [3]**

[1] Ph.D. Student, Department of Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
[2] Associate Professor, Department of Geology, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
[3] Assistant Professor, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Received: 2011 May 03 Accepted: 2014 April 26

**Abstract**

Mechanical characterizations of sedimentary cover, especially presence of ductile rock units is a major controlling parameter on deformation style within fold and thrust belts. Interpretation of seismic profiles as well as scaled analogue modeling allows us to determine the influence of ductile levels on structural style in the Central Zagros folded belt. Seismic interpretation indicates that the Miocene Gachsaran Formation forms a major median detachment level decoupling fold geometry in surface structures from Pre-Miocene units below it. In addition, the Infra-Cambrian Hormoz salt or equivalents decouple the folded sedimentary cover from basement. To evaluate the significance of multiple detachment levels, a scaled analogue model was set. Two layers of silicon putty, with thicknesses equal to 15% of total cover thickness, were placed at the base and in the middle of sedimentary cover. The rest of the sedimentary cover was simulated using dry loose sand. The result of modeling supports seismic interpretation of the Central Zagros proposing that thick middle detachment layer totally decouples structural style at surface from depth. However, the open synclines with long wavelength and low angle thrusting are developed at surficial levels, and duplex thrust systems are formed between two detachment levels. Therefore, the role of ductile detachment levels should be obtained before exploring deep hydrocarbon targets in the Zagros fold belt.

**Key words:** Detachment level, Zagros fold-thrust belt, Analogue modelling.

For Persian Version see pages 329 to 334

*Corresponding author: A. Yassaghi; E-mail: yassaghi@modares.ac.ir

Created with nitroPDF professional
download the free trial online at nitropdf.com/professional